



·粒子束及加速器技术·

小型回旋加速器全自动化磁场测量和 精密垫补平台研制*

关镭镭, 李明, 崔涛, 贾先禄, 张天爵, 安世忠, 黄鹏, 王飞

(中国原子能科学研究院核技术综合研究所, 北京 102413)

摘要: 针对核医学诊疗对 PET 医用放射性核素的需求, 中国原子能科学研究院正在开展 PET 医用小型回旋加速器的产业化研究。磁场测量和垫补是回旋加速器生产中的必经环节, 小型回旋加速器结构紧凑实现磁场测量仪的全自动化控制是一个难点, 解决常规垫补方法加工成本高和周期长的问题是产业化生产的关键。本文详细介绍小型回旋加速器全自动化磁场测量和精密垫补平台的研制, 通过多台小型回旋加速器的磁场测量和垫补实践, 发展一套快速磁场测量和垫补流程, 实现全自动化测量方法缩短磁场测量周期, 采用精密垫补算法减少垫补次数。在保证磁场测量和垫补工作高效高质量完成的条件下, 极大降低了时间和加工成本, 为小型回旋加速器的产业化生产打下基础。目前, 中国原子能科学研究院已经完成多台小型回旋加速器的商业化落地。

关键词: 小型回旋加速器; 紧凑型; 全自动; 磁场测量; 精密垫补

中图分类号: TL54

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210514

Development of a fully automated magnetic field measurement and shimming platform for small cyclotrons

Guan Leilei, Li Ming, Cui Tao, Jia Xianlu, Zhang Tianjue, An Shizhong, Huang Peng, Wang Fei

(Institute of Nuclear Technology, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: In response to the demand for PET medical radionuclides in nuclear medicine diagnosis and treatment, China Institute of Atomic Energy is conducting research on the industrialization of PET medical small cyclotrons. Magnetic field measurement and shimming is the key point in the production of cyclotrons. The compact structure of small cyclotron is a difficulty to realize the full automatic control of magnetic field measuring instrument and solving the problems of high processing cost and long cycle of conventional shimming method is the key to industrialized production. This article will introduce in detail the development of a fully automated magnetic field measurement and precision shimming platform for small cyclotrons. Through the magnetic field measurement and shimming practice of multiple small cyclotrons, a set of rapid magnetic field measurement and shimming procedures will be developed to realize fully automatic measurement method to shorten the magnetic field measurement cycle and reduce the time of shimming by precision shimming algorithm. Under the condition of ensuring high efficiency and high quality of magnetic field measurement and shimming, the time and the processing cost are greatly reduced, which lays a foundation for the industrialized production of small cyclotrons. At present, the China Institute of Atomic Energy has completed the commercialization of several small cyclotrons.

Key words: small cyclotron, compact, fully automatic, magnetic field measurement, precision shimming

中国原子能科学研究院是国内第一批开展研究癌症诊断和治疗用回旋加速器的单位, 于 1995 年研制成功国内第一台用于同位素生产的 30 MeV 回旋加速器, 它主要用于短寿命医用放射性同位素的生产, 引出质子能力为 15~30 MeV 连续可调, 束流可双向引出同时生产不同品种的放射性同位素。在 2009 年搭建完成一套为 100 MeV 强流回旋加速器关键部件提供设计验证的强流回旋加速器中心区综合实验装置, 并在此基础上成功研制

* 收稿日期: 2021-11-24; 修订日期: 2022-04-24
联系方式: 关镭镭, guanll_1988@126.com。
通信作者: 李明, 393054642@qq.com。

了一台可用于 PET 制药的 10 MeV 小型回旋加速器工程样机^[4], 后升级该样机到 14 MeV 并进行了技术固化和产品标准化。

2021 年 3 月, 国家国防科工局会同科技部、公安部、生态环境部、交通运输部、国家卫健委、国家医保局、国家药品监管局等八部委联合发布了《医用同位素中长期发展规划(2021-2035)》。规划指出“预计每年我国将有数千万人次需要开展核医学诊断与治疗, 按此推算今后我国医用同位素需求将呈现爆发式增长”; 规划中还提到“原则上在地级市至少建立一台国产医用同位素生产专用加速器”。因而, 推测国内未来医用小回旋加速器市场容量在 300 台以上, 而目前国内装机小型回旋加速器约 160 台, 绝大部分来自进口, 每年仍需进口约 20 台。为了实现核医学诊疗全产业链自主可控, PET 医用小型回旋加速器的国产化和产业化势在必行。本文提出了一种适用于极小磁气隙回旋加速器的全自动化磁场测量装置和高效精密的磁场垫补方法, 实现自动化磁场测量, 缩减磁场测量和垫补周期, 为实现小型回旋加速器产业化生产打下基础。

1 磁场测量和垫补

中国原子能科学研究院自主研发的 14 MeV 小型回旋加速器采用紧凑型结构, 磁极采用深谷区设计, 实现了较大的轴向聚焦, 有效压缩轴向束流包络, 因而可以采用极狭窄的磁气隙, 最大程度上降低磁铁线圈的功耗, 同时极狭窄的磁气隙对加速器全自动化磁场测量提出了更大的挑战。图 1 给出了 14 MeV 回旋加速器的整体结构。表 1 为 14 MeV 回旋加速器物理设计参数。

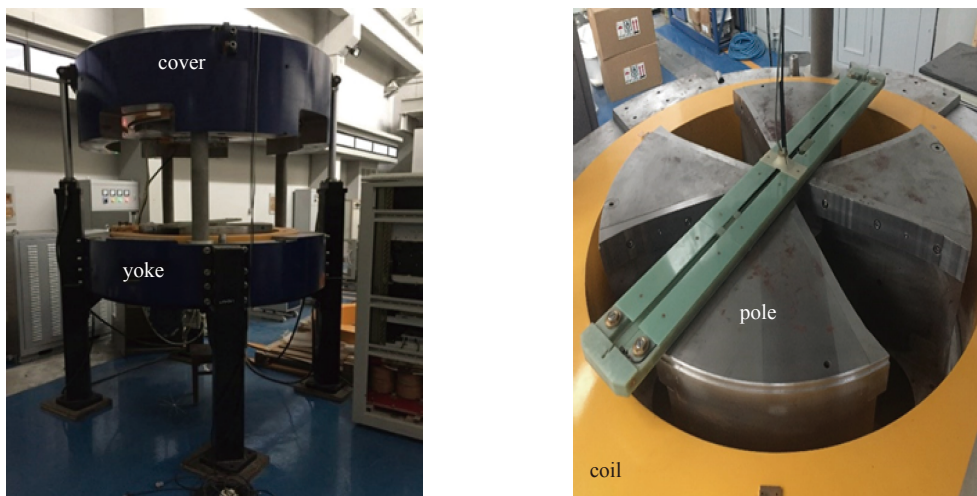


Fig. 1 14 MeV medical cyclotron

图 1 14 MeV 医用回旋加速器

表 1 14 MeV 回旋加速器物理设计参数

Table 1 Physical design parameters of 14 MeV cyclotron

energy/MeV	current/ μ A	radius/mm	pole angle/ $^{\circ}$	hamonic number	frequency/MHz	gain/MeV
14	400	500	52	4	73.02	0.16

磁场测量和垫补是加速器研制过程中的必经过程, 良好的磁场分布是保证磁场等时性和横向聚焦等性能的前提^[5-10]。磁场测量和垫补往往是一个迭代优化的过程^[11], 通过磁场测量数据计算等时性误差和相应地垫补加工, 磁极修正后再通过磁场测量确认, 磁场测量和垫补工艺流程如图 2 所示。因而, 磁场测量和垫补是一个比较耗时的过程, 磁场测量的自动化程度和垫补算法的精度对加速器批量化生产能力起到了决定性的作用。由于 14 MeV 回旋加速器磁气隙仅为 23~26 mm, 常规径向驱动和光栅尺定位方法不适用, 磁场仪的全自动化实现有很大的挑战。14 MeV 回旋加速器采用镶条进行磁场垫补, 每块磁极侧边安装有两组镶条, 上下磁极共 16 组镶条。传统垫补算法精度有限, 迭代次数较多, 需要反复对 16 组镶条进行拆装、加工, 耗时较长且成本高, 因而, 有必要发展新的更高精密度垫补算法, 提升医用小型回旋加速器的批量化生产能力。

2 物理要求

14 MeV 回旋加速器采用霍尔效应法进行磁场测量, 要求测量磁场的径向范围为 0~50 cm, 间隔为 1 cm; 角向范

围为 0~360°, 角向间隔为 1°; 磁场测量范围为 0.2~1.9 T。测磁仪的测量误差主要包含高斯计的测量误差和位置精度带来的测量偏差, 这种误差包含随机误差和系统误差, 根据物理计算得到的加速器中心平面磁场分布并结合束流动力学计算, 表 2 给出了磁场测量的各项误差要求。

3 全自动化磁场测量系统

对于回旋加速器磁场测量和垫补, 整套磁场测量设备要求具有全自动化控制、磁场测量精度高、易拆卸易维护, 通用性强等特点^[12-13]。磁场测量和垫补主要涉及磁铁电源和水冷系统、温度监测系统、磁场测量探头校准系统、磁铁测量台架、磁场测量控制和磁场信号获取系统等。

在磁场测量中, 首先应保证磁场测量装置位于加速器磁场内部的部件无磁性且运动过程不明显产生涡流^[14-15]。磁场测量装置搭载探头能够围绕加速器中心轴顺时针和逆时针任意旋转, 同时可以沿径向往复运动。配合探头的径向和角向运动, 制定合理的磁场测量方案, 完成加速器中心平面磁场的测量。

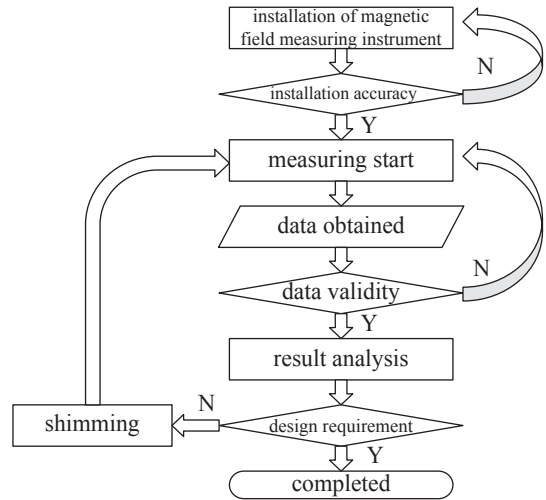


Fig. 2 Flow chart of magnetic field measurement and shimming process

图 2 磁场测量和垫补工艺流程图

表 2 磁场测量误差要求

Table 2 Magnetic field measurement error requirement

random error	field measuring	radial measuring	radial positioning	angle measuring	angle positioning
	error/T	error/mm	error/mm	error/s	error/s
	2×10^{-4}	0.1	0.1	12	20
system error	measuring arm	measuring arm	probe horizontal	probe tilt	center shaft
	horizontal error/mm	axial error/mm	position error/mm	error/(°)	tilt error/(°)
	0.1	0.2	4	2	0.2

3.1 机械结构

相比于中大型回旋加速器, 小型回旋加速器一般采用紧凑型结构设计, 尽可能减小加速器占用空间和功率损耗。磁极间隙设计参数一般在 23~26 mm 之间, 这样极小的磁极间隙, 有限的空间对磁场测量工作提出了难题。

小型回旋加速器的常用磁场测量方案是采用半自动化人工辅助的方式进行, 即角向运动通过自动定位控制方法实现; 径向运动通过人工推动滑块的方式进行, 使用标准长度的滑块推动探头前进固定距离, 以此在保证探头定位精度的条件下完成径向运动, 如图 3 所示, 单次磁场测量时间一般在 15 h 以上。为解决磁场测量周期长, 消耗人力时间的问题, 中国原子能科学研究院回旋中心自主设计出一套适用于小型回旋加速器的全自动化磁场测量装置。

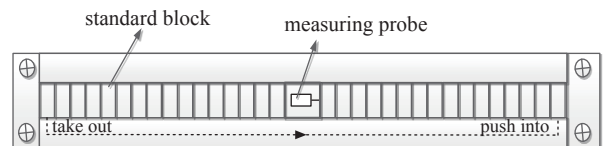


Fig. 3 Schematic diagram of radial positioning method for magnetic field measurement

图 3 磁场测量径向定位方法示意图

全自动化磁场测量装置主体机械结构主要由支撑轨道、测量臂、霍尔探头座、角向旋转组件、径向驱动绳轮组件、径向驱动传送带、中轴定心组件等部分构成。磁场测量装置支撑轨道作为测量臂的支架, 采用非导磁的铸造铝合金材料, 二者之间有两圈滚珠支撑, 减小运动过程中的阻力。角向旋转平台内置编码器, 通过中心轴驱动测量臂旋转。中轴定心组件保证测磁仪绕加速器中心旋转, 同时也从中心位置支撑测磁仪的重量, 如图 4 所示。

全自动化磁场测量装置采用间接径向定位方法实现了极小气隙回旋加速器的全自动化测量, 将位于磁场测量装置测量臂内的霍尔探头两端与传送带连接, 通过径向驱动绳轮组件实现磁场测量探头径向运动, 根据绳轮转动角度得到传送带运动的距离间接求得径向位置, 这样便使磁场测量径向定位装置由加速器内部转移到加速器外部绳轮组件处, 解决了小型回旋加速器磁极间气隙极小无法安装定位光栅尺的问题。传送带选用去应力钢丝绳或凯夫拉纤维材质的绳子, 在保证一定强度的基础上尽量减小绳子弹性, 降低绳子弹性形变带入的定位误差, 提高运动精度。

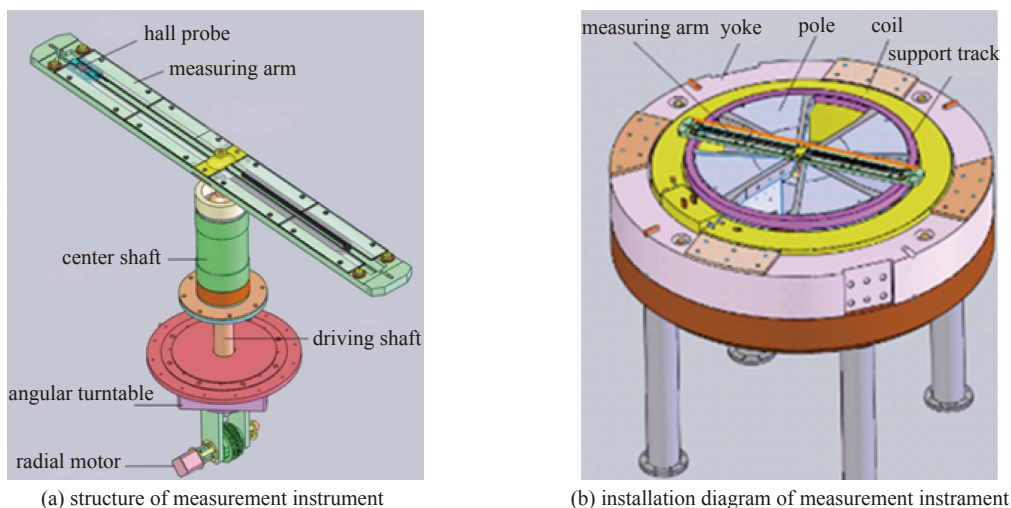


Fig. 4 Schematic diagram of fully automated magnetic field measuring device

图 4 全自动化磁场测量装置示意图

3.2 控制系统

磁场测量装置的控制系統主要分为径向运动和角向运动控制两部分, 径向运动控制器通过位置给定和位置反馈输出给伺服电机驱动器一个模拟量的速度信号, 实现三相交流永磁同步伺服电机的 SVPWM 控制算法, 并驱动电机; 角向运动控制器通过计算输出计数脉冲, 驱动步进电机, 实现开环控制, 根据角度编码器反馈的位置信号, 通过软件算法实现间接闭环控制; 可使角向定位在误差限 5 s 内。磁场测量装置的控制流如图 5 所示。

在磁场测量装置运动时, 采用变速控制策略, 即在控制系统驱动测量探头运动到目标位置的过程中, 测量探头运动分段进行。在初始速度驱动下探头靠近目标位置, 在探头到达目标位置一定范围内, 运动减速, 使探头能够缓慢到达目标位置。这样有效避免了由惯性所导致的探头运动过量而产生非必要的往复运动, 即使在运动过程中存在减速, 但是整体定位时间得到缩短。通过对全自动化磁场测量装置的测试单次磁场测量时间由 15 h 减少到 6 h。

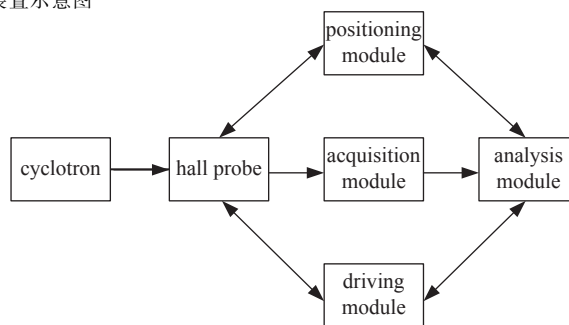


Fig. 5 Control flow chart

图 5 磁场测量仪的控制流程

4 精密磁场垫补算法

4.1 垫补原理

当回旋加速器主磁铁中心平面的磁场测量完成后, 磁场的分布不满足束流动力学的要求, 需要通过调整主磁铁磁极两侧的镶条角宽度对中心平面磁场进行垫补, 对回旋加速器而言, 一般采用减小角宽度的方法进行垫补, 为避免由于计算误差而导致镶条切割过量, 每次垫补都留有一定的余量, 分多次进行。中国原子能科学研究院回旋中心提出了一种高效的垫补算法用于强流质子小型回旋加速器的等时性磁场垫补, 加快磁场垫补过程的收敛速度, 减少垫补次数。

4.2 垫补算法

在磁场垫补过程中, 将镶条沿径向方向分成奇三角形和偶三角形, 通过有限元数值计算模拟回旋加速器主磁铁镶条沿径向上某点 R_i 附近区域切除长为 L 、高为 H (L 和 H 可根据加速器磁铁镶条的实际长度和厚度进行选择) 的三角形面积 (如图 6) 对平均磁场的影响。图 7 为在镶条不同半径处切除奇三角形和偶三角形时回旋加速器平均磁场的变化量, 以此作为加速器磁场垫补的形状函数。

在计算奇偶三角形引起的平均场变化时, 为减小剖分的差异带来磁场偏差, 在有限元模拟中采用了相同的剖分网格, 即将奇或偶三角形所在区域的体特性分别赋予铁的磁导

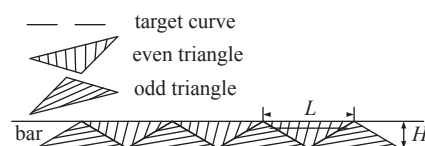


Fig. 6 Even and odd triangles on the strip

图 6 奇偶三角形在镶条上分布

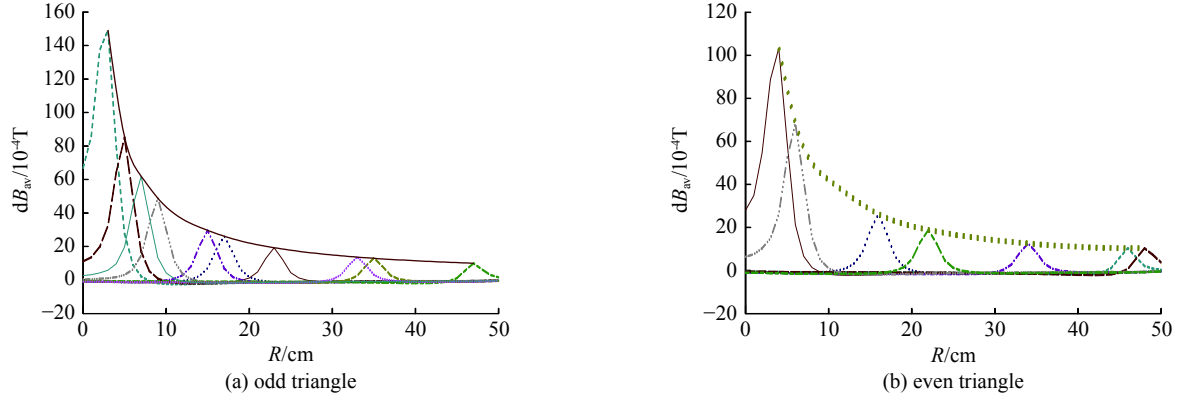


Fig. 7 Shape function of odd and even triangle shimming algorithm
图 7 奇偶三角形垫补算法形状函数

率和空气的磁导率,而该区域的剖分网格大小相一致。将奇偶三角形引起平均场随半径的变化进行规一化处理,则分成平均场幅值和形状因子。根据平均场幅值随半径变化的特点,采用最小二乘法拟合曲线方程,奇偶三角形引起平均场变化的幅值的拟合方程形式为

$$\begin{cases} f_E(R) = a/R + b \\ f_O(R) = c/R + d \end{cases} \quad (1)$$

式中: a, b, c, d 由加速器主磁铁参数确定, $f_E(R_i)$ 和 $f_O(R_i)$ 为幅值的拟合函数, 可以表示半径 R_i 位置的切割三角形面积大小对 R_i 处平均磁场的影响。同样, 根据规一化形状因子的特点, 规一化形状因子的拟合方程形式为高斯分布

$$\begin{cases} g_E(R) = a_2 e^{-(R-R_i)^2/b_2} + c_2 e^{-(R-R_i)^2/d_2} \\ g_O(R) = a_1 e^{-(R-R_i)^2/b_1} + c_1 e^{-(R-R_i)^2/d_1} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $g_E(R-R_i)$ 和 $g_O(R-R_i)$ 为归一化形状函数, 分别表示该切割三角形对各个半径 R 处的磁场影响大小权重。因此, 镶条任意点 R_i 处的切割三角形对任意半径 R 上的平均磁场的影响可以表示为

$$\begin{cases} \Delta B_E(R) = f_E(R_i) \times g_E(R-R_i) \\ \Delta B_O(R) = f_O(R_i) \times g_O(R-R_i) \end{cases} \quad (3)$$

5 磁场测量和垫补实践

5.1 磁场稳定性

在磁场稳定的条件下进行磁场测量是保证磁场垫补数据准确性的关键^[6]。加速器工作时磁场受多方面因素影响, 对于小型回旋加速器磁场测量精度要求而言, 其影响因素主要包括磁场测量期间主磁铁电源稳定性、磁铁温度等。根据以上磁场稳定性测试结果, 如图 8 所示, 在磁场测量过程中, 各项影响因素在设备运行 1~2 h 后进入

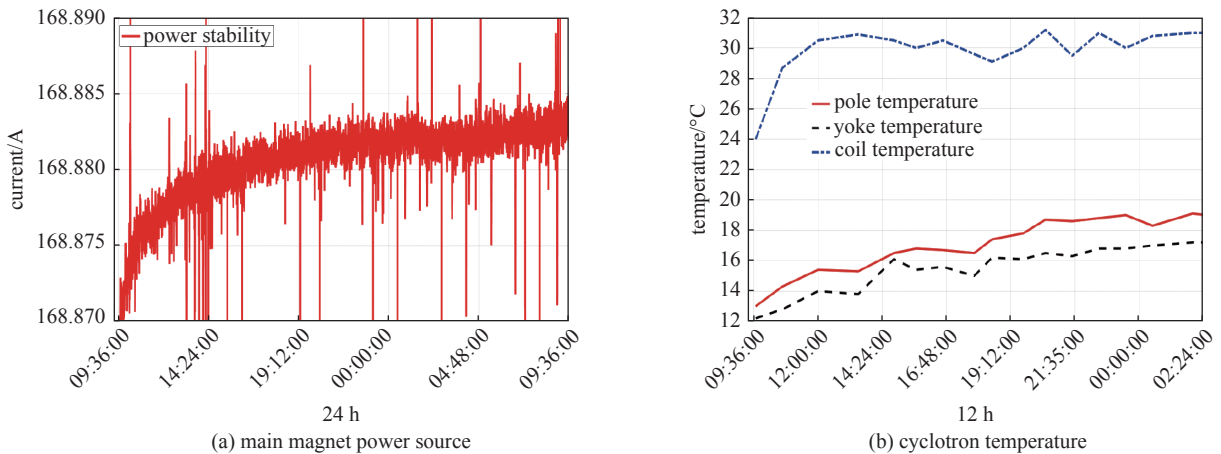


Fig. 8 Results of magnetic field measurement stability test
图 8 磁场测量稳定性测试结果

稳定状态,且单次测量应在5~8 h完成,以避免外界其他不定因素影响,保证测量结果的准确性。

5.2 定位精度和测量重复性

在磁场测量装置安装完成后,在主磁铁励磁状态下并达到稳定后进行径向运动测试和角向运动测试,以验证磁场测量装置的定位精度和重复性。分别选择在 0° 和 360° 两个角度位置完成加速器径向磁场测量,通过比较两次径向磁场测量结果可以看出,测量偏差在 $\pm 2 \times 10^{-4}$ T内;将测量探头放在固定半径位置,进行 0° 到 720° 两周重复性测量,测量结果如图9所示,可以看出磁场测量偏差在 $\pm 5 \times 10^{-4}$ T以内,由于测量偏差具有随机性,在计算平均磁场时会产生相互抵消的作用,实际的平均磁场测量偏差会更小,以上测试结果验证了全自动化磁场测量装置的测量精度要求。

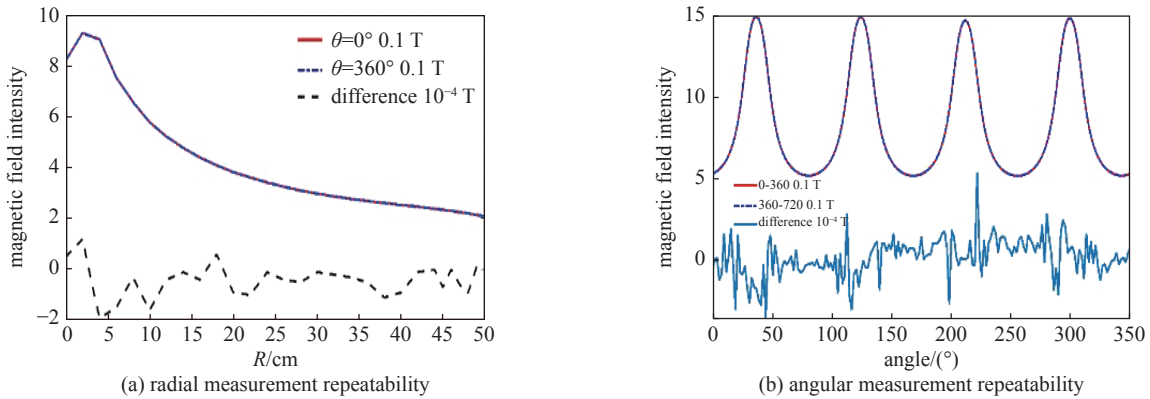


Fig. 9 Results of magnetic field repeatability measurement

图9 磁场重复性测量结果

5.3 垫补计算

在保证磁场测量精度和测量重复性的条件下,PET小型回旋加速器经过5次磁场测量和3次垫补完成最终磁场测量和垫补工作,总共经历了42 d的时间,磁场垫补结果如图10(a)所示,垫补磁场结果与目标磁场的偏差是由加速器垫补加工、装配及测试误差等结果导致的,在满足加速器物理设计要求的情况下,并不只有唯一的磁场垫补结果。

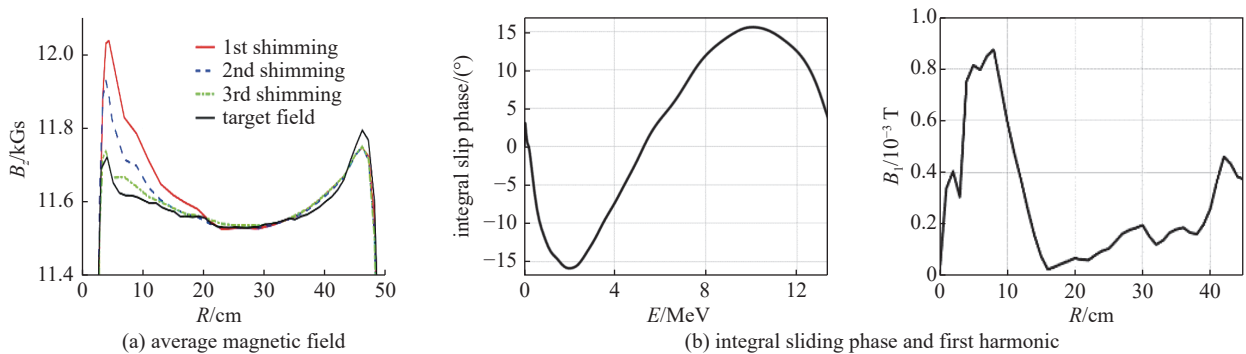


Fig. 10 Results of 14 MeV small cyclotron final magnetic field measurement shimming

图10 14 MeV小回旋最终磁场测量垫补结果

小型回旋加速器为得到的更好束流品质提高引出效率,尽可能降低积分滑相和一次谐波,前者影响束流的加速效率,后者会激发粒子的径向振荡振幅。采用全自动化磁场测量装置和精密垫补算法得到最终测量结果满足束流动力学的设计要求,积分滑相能够保持在 $\pm 15^\circ$ 以内,且一次谐波控制在较低的水平,小半径下一次谐波幅值小于 10×10^{-4} T,大半径下一次谐波幅值小于 5×10^{-4} T,如图10(b)所示,对提高PET小型回旋加速器的引出流强是至关重要的。

6 结论

全自动化磁场测量和精密垫补平台大幅度提高了磁场测量和垫补的工作效率,高质量的测量垫补结果满足小型回旋加速器物理设计要求。在磁场测量过程中发现,平台的安装便捷性、设备通用性等方面仍存在很大的提高

空间；同时在磁场测量的工作中还有许多需要考虑的方面，如磁场测量环境湿度变化、磁铁磁性能随温度的变化规律等也是影响加速器磁场测量和垫补的可能因素，为了得到更准确的磁场测量结果，应该对这些问题给与足够的关注，在后续工作中逐步进行补充完善。

参考文献：

- [1] 樊明武, 张兴治, 李振国. 强流质子回旋加速器CYCIAE30建成[J]. *科学通报*, 1995, 40(20): 1825-1828. (Fan Mingwu, Zhang Xingzhi, Li Zhengu. Construction of high intensity proton cyclotron CYCIAE 30[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1995, 40(20): 1825-1828)
- [2] 李振国, 吴隆成, 葛涛, 等. 10MeV强流回旋加速器的束流调试[J]. *原子能科学技术*, 2011, 45(5): 588-594. (Li Zhengu, Wu Longcheng, Ge Tao, et al. Beam test of 10MeV high intensity cyclotron[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2011, 45(5): 588-594)
- [3] 张天爵, 李振国, 储诚节, 等. 强流回旋加速器综合试验装置的设计与建造[J]. *中国物理C*, 2008, 32(s1): 237-240. (Zhang Tianjue, Li Zhengu, Chu Chengjie, et al. Test stand design and construction for high intensity cyclotron development[J]. *Chinese Physics C*, 2008, 32(s1): 237-240)
- [4] 张天爵, 李振国, 储诚节, 等. 强流回旋加速器综合试验装置的研制[J]. *科学通报*, 2011, 56(3): 238-244. (Zhang Tianjue, Li Zhengu, Chu Chengjie, et al. Comprehensive test stand for high-intensity cyclotron development[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(3): 238-244)
- [5] 张天爵, 樊明武, 安世忠, 等. CIAE回旋加速器及应用综述[J]. *原子能科学技术*, 2020, 54(s1): 275-292. (Zhang Tianjue, Fan Mingwu, An Shizhong, et al. Review of cyclotrons and their applications at CIAE[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2020, 54(s1): 275-292)
- [6] 王胜龙, 王川, 张天爵, 等. 50 MeV负氢回旋加速器主磁铁设计研究[J]. *原子能科学技术*, 2019, 53(9): 1681-1686. (Wang Shenglong, Wang Chuan, Zhang Tianjue, et al. Study on main magnet design of 50 MeV H⁻ cyclotron[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2019, 53(9): 1681-1686)
- [7] Zhang Tianjue, Lu Yinlong, Yin Zhiguo, et al. Overall design of CYCIAE-14, a 14 MeV PET cyclotron[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2011, 269(24): 2950-2954.
- [8] Li Ming, Lyu Yinlong, Zhang Tianjue, et al. Progress on field mapping system for 230 MeV superconducting cyclotron[J]. *Annual Report of China Institute of Atomic Energy*, 2017: 206-207.
- [9] 张天爵, 樊明武. 回旋加速器物理与工程技术[M]. 北京: 原子能出版社, 2010. (Zhang Tianjue, Fan Mingwu. *Physics and engineering technology of cyclotron*[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2010)
- [10] Turner S. CAS - CERN Accelerator School: Magnetic measurement and alignment[M]. Montreux, Switzerland: CERN, 1992.
- [11] Li Ming, Zhong Junqing, Cui Tao, et al. Application and development of a method to shim the isochronous field in small cyclotrons[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016, 26: 4101504.
- [12] 曹磊, 李明, 吕银龙, 等. 超导回旋加速器磁场测量仪控制系统设计[J]. *核电子学与探测技术*, 2018, 38(3): 346-349. (Cao Lei, Li Ming, Lv Yinlong, et al. The design of field mapping control system for superconducting cyclotron[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2018, 38(3): 346-349)
- [13] Li Ming, Lv Yinlong, Cao Lei, et al. Field mapping system design for the superconducting cyclotron CYCIAE-230[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, 28: 9001204.
- [14] Beeckman W, Schuwer M, Vandeplassche D, et al. The C235 IBA-SHI protontherapy cyclotron for the NPTC project progress report of the magnetic field mapping and shimming[C]//Proceedings of the 14th International Conference on Cyclotrons and their Applications. Cape Town, 454-457.
- [15] Roy A, Bhattacharjee T, Chaddha N, et al. Median plane magnetic field mapping for super conducting cyclotron (SCC) in VECC[R]. Indore: Raja Ramanna Centre for Advanced Technology (RRCAT), 2007: 652-654.
- [16] 赵籍九, 尹兆升. 粒子加速器技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 11. (Zhao Jijiu, Yin Zhaosheng. *Particle accelerator technology*[J]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 11)